

博士論文審査報告書

論文題目

Buckling Behavior and Design of Steel Liner
Encased in Deep Water Tunnel under External
Hydrostatic Pressure

大深度地下水道管の外水圧による座屈挙動
および設計に関する研究

申請者

王	劍宏
Wang	Jianhong

理工学研究科 建設工学専攻 構造設計研究指導

2009年2月

都市部では長い期間にわたって各種のインフラ施設や地下構造物の建設が進められてきており、現在ではその中浅深度の地下は相当に混雑している。その結果、水を安定的に供給するために都市部に新たな導水管路施設や水道管路施設を建設する場合には、大深度地下を使用せざるを得ない状況になってきている。

従来から、大規模な管路施設の構造は2つに大別される。まず、シールド工法や開削工法などによりトンネルを構築し、その後、トンネルの内側に支持架台を設けて、その上に鋼管やダクト管を載せて収容する構造（以降、独立構造と呼ぶ）と、トンネルの内側に管を挿入し、両者の間に間詰めをして両者を一体化する構造（以降、一体型構造と呼ぶ）である。独立構造の場合は、水道管には内水圧が作用するだけで構造的には単純で問題もほとんどないが、トンネル内に支持架台や管路を収容するため大きなトンネル断面が必要となり、とくにそれを大深度に構築する場合には不経済となる。一方、一体型構造の場合にはトンネル断面は小さくてすむが、管は内水圧だけでなくトンネルに作用する土水圧の変動やトンネルの変形などの影響を受け、逆に、トンネルは管内の水流による振動や水圧の変動、水温の影響などを直接受けることから、これらをあらかじめ考慮に入れて設計しておく必要があり、トンネルも内挿管もその構造は重厚にならざるを得ない。また、一体型構造の場合には、間詰め材の硬化にともなう体積の収縮や間詰め材の充填の困難さによる管頂部での空隙の発生なども避けられない。

本研究では、大深度の高水圧下のトンネルに収容する管とトンネルとの間に間詰めをしないで、それぞれを独立の構造とする分離型構造を対象としている。その基本的な考え方は独立構造と同じであるが、トンネルの内径と内挿管の外径との間隔を可能な限り小さくし、両者間に間詰めを行わないものである。分離型構造にはトンネルの掘削断面の縮小が図れること、トンネルと内挿管とが独立であり相互に干渉が生じないため、内挿管は内圧を受けるだけの設計でよく薄肉管を使用することが可能であること、必要に応じて一次覆工と内挿管とを併行して施工することができ、工期の短縮やコストの縮減が図られることなどの利点がある。

しかし、水道管を収容するトンネルは必ずしも完全に防水されたものではなく、長期にわたる供用中にはトンネルと管との間の狭いすき間に漏水が侵入することが予想される。このすき間を完全に漏水が満たせば管には外水圧が作用することになり、それが大深度地下に建設される管であれば、とくに大きな外水圧を受けて内挿管が座屈する懸念がある。このため、あらかじめ管の座屈挙動を把握し、合理的な座屈設計を実施しておく必要がある。内挿管の座屈はその安全性を考えるうえで重要な問題でありながらもまだに解決できておらず、国内外で水道管の座屈事故が発生している。このような座屈による事故を防ぐためには、厚肉の内挿管を使用せざるを得ない現状にある。

トンネル中の鋼管の座屈に関しては、自由管の座屈理論（ロータリ多波数座屈理論）と拘束管の座屈理論（シングルロブ座屈理論）との2つの理論がある。前

者は外水圧の作用によって円周長が縮み，トンネルと管とのすき間が拡大するため，座屈は自由管と同じに考えてよいとするものである．後者は管に作用する水圧により管が変形し，その一部分がトンネルと接触することによって拘束される一方で，非接触部分は内側に曲げ変形し，いわゆるシングルロブを形成して座屈すると考えるものである．分離型構造の水道管の場合には，その支持状況によってどちらの現象も発生する可能性がある．トンネルと水道管との間に等間隔にゴム板などを入れて水道管を支持する分離型水道管構造の場合には，両者の間にすき間が保たれるので自由管として考えられる．一方，施工の容易性を考え，水道管とトンネルの間のインバート部分にのみ砂やゴム板などを入れて支持する構造の場合には，自重と静水圧による初期変形を考慮して拘束管としての座屈を考える必要がある．

本研究は，以上のような背景から，分離型構造をもつ内挿管に外水圧が作用した場合の座屈挙動を検討したものであり，補剛されていない内挿管と，断面方向にリング状の補剛部材をもつ内挿管とを研究の対象としている．

本論文は 6 章で構成されている．

第 1 章は序論であり，本研究の背景，導水管路や水道管路の構造，それらを大深度地下に構築する場合の問題点，従来からの管の座屈理論とそれらの分離型構造の水道管への適用性などの検討を行い，最後に本研究の目的および本論文の構成を述べている．

第 2 章は「外圧による自由管の座屈」について述べられた章である．まず，自由管の座屈理論式，非線形座屈および初期不整の考え方，座屈の数値解析方法など，従来の研究を検討し，これに考察を加えている．つぎに，FEM による数値解析法を用いてリング状の補剛材をもつ自由管（以降，自由補剛管と呼ぶ）の座屈挙動を検討し，補剛材の剛性に応じて，全体座屈と局部座屈の 2 つの座屈形態があることを検証している．また，補剛材の曲げ剛性および補剛間隔，鋼管の径，厚さおよび長さが座屈荷重や座屈形態に与える影響を検討し，最後に，自由補剛管の座屈は単純圧縮状態から急激に変形が生じ不安定状態となる現象であり，座屈が発生するまでは水圧の作用方向が変わらないことから，従来の座屈解析手法を適用することができると考え，鋼管には薄肉シェルの曲げ理論，補剛材にはリングはりの理論を適用し，座屈形態に応じて Ritz の方法を用いて，実務に簡単に使える自由補剛管の座屈理論式を導き，その具体的な座屈計算の方法，すなわち，「二段階座屈計算法」と座屈挙動のシミュレーションの方法を提案している．これらの方法の妥当性は数値解析および既往の実験結果を用いて検証し，従来の理論式と比較して，提案した方法の優位性を明らかにしている．

第 3 章は「外圧による拘束管の座屈」について述べられた章である．この章では，まず，従来の Amstutz や Jacobsen のシングルロブ座屈理論と座屈設計の実

務によく使われている増大係数の理論，および FEM による接触解析を考慮した座屈解析方法について述べている．また，これらの理論や解析では，管に作用させる外荷重を等水圧とするものが多いが，実際の分離型構造の水道管には静水圧分布する荷重や管の自重が作用する．そのため，FEM による数値解析には，これらの荷重を考慮したうえで接触解析法を適用し，補剛材がない場合と補剛材がある場合の鋼管の座屈解析を行って，座屈位置の予測方法と Amstutz 式などの適用性を検証している．その結果，補剛材がない鋼管の場合には，Amstutz および Jacobsen の理論式による理論値が FEM による解析値とほぼ一致するが，補剛材がある場合にはこれらの式が適用できないことを明らかにしている．さらに，簡単な実験を行ってシングルロブ座屈の破壊メカニズムを検討し，それと Jacobsen の理論にもとづいて，補剛状況に応じたシングルロブ座屈の理論解析方法を提案し，その妥当性を数値実験により検証している．

第 4 章は「継手がある鋼管の座屈」について述べた章である．ここでは，継手の剛性が異なる 7 つモデルの簡単な座屈実験を行い，継手の剛性が座屈荷重や座屈形態に与える影響を調べ，継手の剛性を考慮した鋼管の座屈の理論的な解析方法を提案して，それが実験結果や数値解析結果に符合することを確認している．

第 5 章は水道管の設計例を具体的に示して，その結果に検討を加えた章である．まず，水道管の設計方法の手順を示し，従来の一体型構造の場合，分離型構造で円周方向に均等に支持されている自由管の場合，およびインバートのみで支持されている拘束管の場合とに分けて水道管の座屈設計を行っている．それをもとに，一体型構造の鋼管の場合には充填の欠陥による座屈への影響を明らかにし，分離型構造の場合には，自由補剛管と拘束補剛管を対象に局部座屈設計法を具体的に提示している．さらに，それらの設計結果にもとづいて，水道管に最適と思われる構造を提案している．

第 6 章は本研究を総括した「総括および結論」であり，本研究の主な内容をまとめ，得られた知見と今後の課題を示した章である．

以上に述べたように，本研究は導水管や水道管の外水圧による座屈挙動を明確にし，管の全体座屈と局部座屈とを統一的に取り扱うことが可能な「二段階座屈計算法」を提案したものである．その成果は構造設計学の発展に寄与するところ大なるものがあり，博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる．

2009 年 2 月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	小泉 淳
	副査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	関 博
		早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	依田照彦
		早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理